Сведения о выполненных работах в 2017 году
по проекту **«Научные основы технологии синтеза новых высокопрочных нанокомпозитов на основе легких сплавов для приложений в транспортных и космических системах»**, поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 17-13-01252

Руководитель д-р физ.-мат. наук Ворожцов Александр Борисович

Проведены теоретические и экспериментальные исследования в области «ударно-волнового» компактирования нано и микропорошков алюминия и смесей порошка алюминия с тугоплавкими порошками нанооксида алюминия, детонационного наноалмаза. Для получения «ударно-волновых» и литых композиционных материалов методами электрического взрыва проводника, плазмохимического синтеза, детонационного синтеза и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) с последующей механохимической обработкой синтезированы наночастицы Al, наноалмаза, нанооксида алюминия, субмикрочастицы боридов алюминия и титана. Проведено исследование и характеризация свойств синтезированных порошков- морфологии, дисперсного и фазового состава, кинетических свойств, в т.ч. при повышенных температурах. Получены модели, позволяющие рассчитать пороговые значения давлений ударной-волны для порошковых смесей алюминий-10 масс. % нанооксида алюминия, алюминий- 10 масс. % наноалмаза. Установлено, что добавка в порошок алюминия более твердых и тугоплавких компонентов (нанооксида алюминия и наноалмаз) повышает пределы давления для получения максимально плотного и однородного компакта методом «взрывного» («ударно-волнового») компактирования. Методом «ударно-волнового» компактирования порошков проведен синтез композиционных материалов на основе алюминия. Были получены материалы из нано- и мико-порошко) чистого алюминия (без добавок) как референсного материала и порошковых смесей: алюминий-10 масс.% наночастицы алмаза, алюминий-10 масс.% нанооксид алюминия. Установлено, что «ударно-волновое» компактирование нанопорошка алюминия позволяет получать наноструктурный алюминиевый материал с плотностью близкой к теоретической. Обнаружено что при «взрывном» компактировании порошковых смесей “нанопорошок алюминия-наночастицы алмаза/оксида алюминия” плотность получаемых материалов снижается (по сравнению с материалом без тугоплавких наночастиц) из-за образования пор вокруг и внутри агломератов наночастиц. Методом рентгеноструктурного анализа показано, что в “ударно-волновых композитах”, содержащих керамические и алмазные наночастицы, сформирована вторая - метастабильная фаза алюминия со значительно отличающимися структурными параметрами. Показано, что механические свойства (предел прочности, твердость) «ударно-волнового алюминия» в 2,5 раза выше по сравнению с технически чистым алюминием. При этом введение наноалмазов и наночастиц оксида алюминия в смеси с порошком алюминия приводит к дальнейшему улучшению механических свойств.

С использованием разработанного оригинального устройства для механического замешивания порошковых материалов в расплав металла были проведены эксперименты по введению частиц диборида титана в расплав алюминия АК7. Обнаружено, что использование механического завихрителя позволяет вводить в алюминиевый расплав тугоплавкие частицы диборида титана, что в свою очередь, способствует получению отливок с мелкозернистой структурой и равномерно распределенными включениями частиц-упрочнтителей (диборид титана). Установлено, что средней размер зерна в сплавах уменьшается с 900 мкм до 400 мкм при введение 0,2 масс. % диборида титана, при этом предел текучести увеличивается с 15 МПа до 65 МПа, предел прочности с 140 МПа до 220 МПа при сохранении исходной пластичности 4,5 %. Изучена гидродинамика процесса перемешивания жидкого (расплавленного) металла в тигле под действием оригинального механического смесителя-завихрителя, выполненного в виде трех перфорированных дисков с размещенными на них штифтами. Получены оценки влияния скорости вращения завихрителя на картину течения жидкости в тигле. Показано, что увеличение скорости вращения завихрителя ведет к интенсивному росту турбулентной диффузии в жидком металле до тех пор, пока поверхность раздела металл-воздух не начнет взаимодействовать с нижним перфорированным диском завихрителя.

С использованием различных методов внешнего воздействия (электростатическое поле, ультразвуковая обработка, вибрационная обработка) получены лёгкие сплавы на основе алюминиевого сплава АК7, упрочнённого наночастицами оксида алюминия. Установлено, что введение 0,2 вес.% наночастиц оксида алюминия способствует уменьшению пористости и среднего размера зерна (с 1000 до 300 мкм) сплава АК7) и увеличению механических свойств: предел текучести с 45 до 60 МПа, предел прочности с 175 до 210 МПа, пластичность с 3,5 до 4,5 %. Получены зависимости, связывающие время воздействия с физико-химическими свойствами частиц и расплава и с характеристиками акустического излучения. Установлено, что электростатический заряд поверхности частицы уменьшает краевой угол смачивания, тем сильнее, чем меньше частица. Ультразвуковое воздействие делает возможным пропитку агломератов частиц расплавом металла, и введения в расплав частиц благодаря создаваемому звукокапиллярному эффекту; время пропитки существенно зависит от значения краевого угла смачивания. Чем меньше краевой угол, тем меньше времени требуется для пропитки частицы с помощью ультразвука.

Разработана физическая и математическая модель пластической деформации дисперсно-упрочненных сплавов с металлической матрицей и частицами второй фазы. Основой элементарных процессов и механизмов пластической деформации скольжения являются возникновение, генерация, движение и аннигиляция дефектов различного типа. Исследована в рамках приближения эффективной однородной деформационной среды релаксация различных элементов дислокационной структуры, включая их аннигиляцию; вычислена интенсивность аннигиляционных процессов. Математическая модель включает уравнения баланса сдвигообразующих дислокаций, призматических дислокационных петель межузельного типа и вакансионного типа,

дислокаций в дипольных конфигурациях вакансионного типа и межузельного типа, межузельных атомов, моновакансий и бивакансий, уравнение, определяющее скорость деформации скольжения и уравнение, описывающее внешнее воздействие на деформируемый материал. В расчетах учитывается, что генерация дислокаций в дипольных конфигурациях начинается при достижении критической плотности дислокаций, величина которой определяется масштабными характеристиками упрочняющей фазы.

Выявлено, что доминирующим элементом дислокационной структуры в дисперсно-упрочненных материалах с недеформируемыми частицами при низких температурах и при малых степенях деформации являются призматические петли у частиц упрочняющей фазы или – при больших степенях деформации – дислокации в дипольных конфигурациях, при высоких температурах – сдвигообразующие дислокации.

В результате расчётов получено, что с увеличением диаметра частиц или уменьшением расстояний между ними напряжение течения возрастает и происходит более интенсивное накопление деформационных дефектов. Выявлено, что образование дислокационных диполей при достижении критической плотности дислокаций приводит к заметному возрастанию коэффициента деформационного упрочнения на кривой течения. Исходя из этого, возможно аномальное поведения коэффициента деформационного упрочнения: в гетерофазных сплавах с большей объемной долей упрочняющих частиц возможно меньшее упрочнение, что наблюдается и в реальном эксперименте.